新疆天山东部森林地表可燃物的热值研究

周　翔[1]，王　鹏[2,3]，布玛丽亚穆·麦麦提[2,3]，王秋琰[2,3]，岳　健[2]

（1. 新疆维吾尔自治区林业规划院，新疆 乌鲁木齐　830011；2. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐　830011；3. 新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测实验站，新疆 策勒　848300）

摘　要：森林地表可燃物是林火传播的重要因素之一，而热值又是表征可燃物燃烧性的重要指标。以新疆天山东部4种典型植被类型下地表可燃物为研究对象，分析地表可燃物热值特征及其与燃点、绝对含水率之间的关系。结果表明：针叶林和阔叶林中，草本与凋落物组分之间差异显著，灌木林中，灌木与凋落物组分之间差异显著；天山东部林区同一林型不同组分热值大小顺序为：凋落物>草本>灌木>腐殖质；草本可燃物组分中针叶林的热值最高（19.38±0.08 kJ·g^{-1}），凋落物可燃物组分中同样是针叶林的热值最高（19.55±0.05 kJ·g^{-1}）；不同组分地表可燃物热值与燃点间的关系存在差异：灌木可燃物组分燃点与热值存在极显著关系（$R^2=0.81$，$P<0.01$），凋落物可燃物组分燃点与热值存在显著相关性（$R^2=0.38$，$P<0.05$），然而草本和腐殖质可燃物组分燃点与热值间无显著相关（$P>0.05$）；另外，所有林型的地表可燃物热值与绝对含水率之间均无显著相关关系。可见，林型、树种以及理化性质等条件综合影响着可燃物的热值含量。研究结果旨在为天山东部森林管理人员准确预测林内可燃物热值能量和潜在森林火险提供理论依据，为区域地表可燃物深入研究提供数据支撑。

关键词：森林；热值；地表可燃物；燃点；绝对含水率；天山东部

森林火灾（即不受控制的高强度植被火灾）对野生动物、物质资产、文化资产、人类健康和生命构成全球性的威胁[1]。可燃物载量决定了森林火灾的碳排放，以及其蔓延程度和强度、发现潜力和从地表火到顶部火过渡的可能性，也是森林防火灭火以及可持续管理的理论依据[1-4]。可燃物通常根据状态分为活可燃物和死可燃物，也可通过所处位置分为地下、地表以及冠层可燃物[5-6]，其中，森林地表可燃物对林火的发生、迅速蔓延以及水平和垂直的扩张起到关键性作用[7]，对林火的传播和延续有重大影响。而引燃可燃物除需氧气和火源等条件外，还取决于其自身含水率、热值、燃点等理化性质的差异[5,7-8]。热值是单位质量（或体积）的可燃物完全燃烧时所放出的热量[9]，是评估森林火燃烧速率和火强度的重要指标和依据。通常来说，可燃物的质量及热值等含量都与火灾强度、火场的蔓延速度以及释放的能量强度成正比[5,10]，通过这些数据可以有效且精准地防火灭火。

国外科研工作者早在20世纪60年代就已经开展了森林可燃物热值方面的研究，例如对森林种植园、高寒苔原植被以及热带潮湿森林植被等热值特征的调查[11-13]，近年来，随着可燃物热值研究的不断深入，家用木材的热值特征也受到一定关注，例如Lunguleasa等[14]研究了非洲热带常用木材水分含量对热值和密度、热释放率和热效率的影响，选择最佳木材。国内森林可燃物热值方面的研究主要集中于地区性的各类型森林系统中植物理化性质的对比或潜在燃烧性。例如，有对新疆天山中部[5]、阿尔泰山[15]、东北大兴安岭[16-17]、云南中部[18-20]等林区的研究，研究大多侧重于地下或冠层中的可燃物燃烧性的分析，亦或是对同一地区不同树种理化性质的分析，对于不同林型森林地表可燃物的研究有限，且对森林不同地表可燃物组分（不同类型枯落物和腐殖质）之间差异特征以及可燃物的燃烧特性

收稿日期：2023-02-07；　**修订日期：**2023-05-09
基金项目：新疆森林可燃物调查与分析（所级横向课题E240010301）
作者简介：周翔（1968-），男，高级工程师，主要从事森林资源调查规划、森林生物量调查、荒漠化沙化监测等工作.
E-mail: 1453971121@qq.com
通讯作者：王鹏. E-mail: wangp@ms.xjb.ac.cn

关注较少。

有研究表明,森林可燃物根据不同的分类(尤其是地表活可燃物和死可燃物)情况,在森林火中的表现,即引起森林火的强度、释放的能量强度以及燃烧速率表现各异[21]。另外,可燃物的燃点也是表征可燃物燃烧性的一个重要指标[17],目前为止对森林可燃物热值与燃点影响林火发生的研究也很少。鉴于此,选择新疆天山东部分布的4种典型植被类型其地表可燃物为研究对象,探讨不同地表可燃物组分热值之间的差异特征及可燃物热值与燃点间的关系,旨在为该地区管理人员准确预测林内可燃物热值能量和潜在森林火险提供理论依据,为区域地表可燃物深入研究提供数据支撑。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

研究区位于新疆天山东部,东至哈密地区伊吾县境内山区及山间盆地,西与博州精河林场相邻,南以天山分水岭为界,北抵天山北麓,横跨哈密、塔城、昌吉、乌鲁木齐4个地州市和16个县(区),东西长约1300 km,南北最宽处约250 km,总面积3.11×10^4 km^2,林地总面积1.08×10^4 km^2,其中有林地面积1.32×10^4 km^2,活立木总蓄积5282.1×10^4 m^3,森林覆盖率22.79%。该区域属于山地地形,山脉的基带为温带荒漠带,属于温带大陆性气候。地理坐标范围为42°24′~44°14′N,84°01′~93°42′E之间,海拔1400~2710 m。该区植被随山地地形和气候的差异而形成明显的垂直分布带,植被类型包括:以天山云杉(*Picea schrenkiana* var. *tianschanica*)和西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)为主的针叶林型,林下分布的灌草以天山花楸(*Sorbus tianschanica*)、忍冬(*Lonicera tatarica*)、高山羊角芹(*Aegopodium alpestre* Ledeb.)以及乳苣[*Lactuca tatarica* (L.) C. A. Mey.]为主,枯落物以主要植被的叶枝果为主;以欧洲山杨(*Populus tremula*)和天山桦(*Betula tianshanica*)为主的阔叶林型,林下分布的灌草以天山花楸、宽刺蔷薇(*Rosa platyacantha*)、西伯利亚早熟禾(*Poa sibirica* Trin.)以及野青茅[*Deyeuxia pyramidalis* (Host) Veldkamp]为主,枯落物以主要植被的叶枝为主;以方枝柏(*Sabina saltuaria*)、宽刺蔷薇、天山绣线菊(*Spiraea tianschanica* Pojark.)以及忍冬为主的灌木林型,灌木下草类有拂子茅[*Calamagrostis epigeios* (L.) Roth]、无芒雀麦(*Bromus inermis* Leyss.)以及直穗鹅观草[*Elymus gmelinii* (Ledeb.) Tzvelev]等,枯落物以主要植被的叶枝刺为主。

1.2　试验方法

1.2.1　样方布设和样品采集　在研究区选取了7个林区,包括哈密(巴里坤)、呼图壁、吉木萨尔、玛纳斯、奇台、乌鲁木齐南山以及乌苏(图1),分别在4种主要森林类型即针叶林(针叶树种总蓄积≥65%)、阔叶林(阔叶树种总蓄积≥65%)、针阔混交林(针叶树种或阔叶树种总蓄积占35%~65%)、灌木林(灌木树种总蓄积≥65%)等设置样地面积大小为666.7 m^2,方形(25.82 m×25.82 m)设置,选择距样地每个角顶点两边3 m处设置4个灌木、草本层、枯落物和腐殖质可燃物载量样方。灌木层调查样方为2 m×2 m,草本层、枯落物层、腐殖质层调查样方为1 m×1 m(图2)。

灌木层采集方法:每个样方选取3株(1~2丛)标准灌木,分别取每株灌木的干、枝和叶相同质量比10%~20%(通过称重,确保干、枝、叶的取样占各标准灌木的干、枝、叶总质量的比相同)混合,同一标准样地内4个样方按照灌木树种分别混合取样,混合后的每份样品不少于500 g,称其鲜重,称重精确到10 g,用于带回实验室测定样方灌木的含水率(干

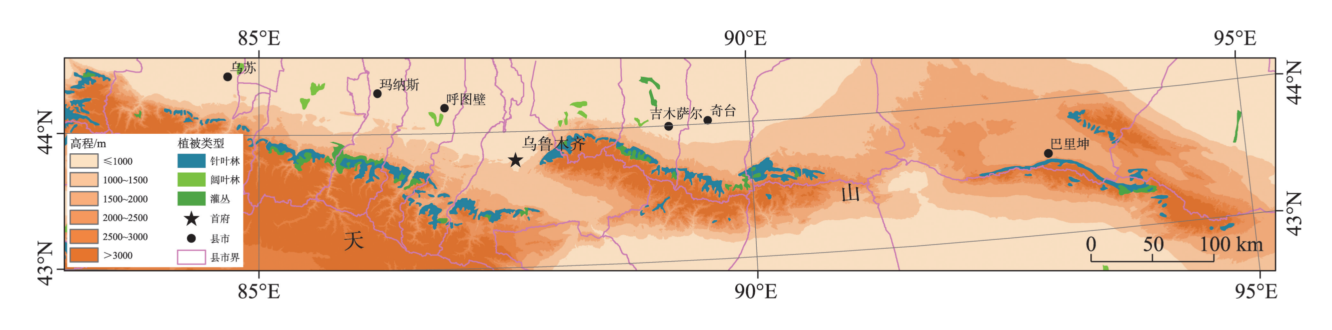


图1　研究区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area

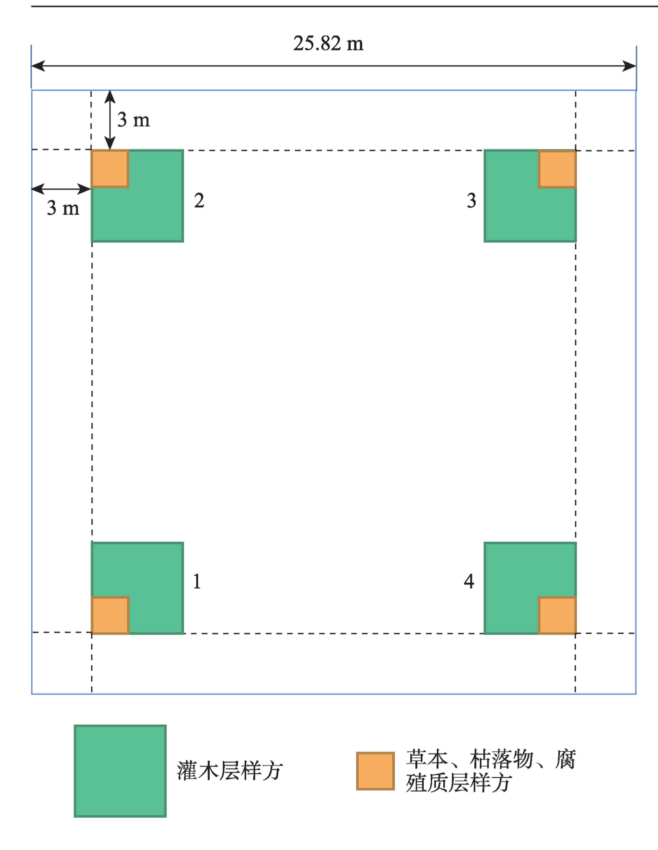


图2 样方设置图

Fig. 2 Quadrat configuration diagram

鲜比)。样品采集好后,将采集的样品分别放入样品袋(纸袋或布袋)内并附上统一编号的标签,同时在样品采集清单上作好记录。

草本层采集方法:沿地面完全收获每个样方所有活草本植物(包括高不足30 cm的灌木)地上部分,称其鲜重,秤重精确到10 g。充分混合标准样地所有样方草本植物各部分,取混合后新鲜草本植物300 g左右,秤重精确到10 g,装入样品袋中,贴上标签,带回实验室测定草本植物的干鲜比或含水率。

凋落物层采集方法:在森林内设置样方,调查凋落物厚度,用耙子收集样方内全部凋落物,包括各种枯枝、叶、果、枯草、半分解部分等枯死混合物,剔除其中石砾、土块等非有机物质。将凋落物分为凋落物1(直径<0.6 cm的小枝、叶和杂草)、凋落物2(直径≥0.6 cm,但<2.5 cm的小枝),凋落物3(直径≥2.5 cm,但<7.62 cm的枝条)。每个样方每类凋落物分别称量其鲜重,称重精确到10 g。样地内所有样方各类凋落物样品分别混合取样,每类取200 g左右,称重精确到10 g,装入样品袋中,贴上标签,带回实验室测定其干鲜比或含水率。

腐殖质层采集方法:调查腐殖质层厚度,采用完全收获法收获每个样方内腐殖质,剔除腐殖质中石砾、土块、明显的树根等非腐殖质,测定和记录样方内腐殖质湿重,并将所有样方样品混合取200 g样品带回实验室测定其干鲜比或含水率。

1.2.2 含水率的测定 采用烘干恒重法对可燃物的含水率进行测定。将野外采集的样品装入牛皮纸信封,用电子天平称其质量,减去空牛皮纸信封的质量得到可燃物湿质量;再将样品放入恒温干燥箱内,在105 ℃下烘至恒重。当样品质量在2 h之间变化小于0.01 g时,称量得出样品的干质量。计算绝对含水率:

$$AMC = (W_H - W_D)/W_D \times 100\%$$

式中:AMC为绝对含水率(%);W_H为可燃物湿质量(g);W_D为可燃物烘干后的绝干质量(g)。

1.2.3 热值和燃点的测定 将待测的样品进行烘干(60~80 ℃),烘干到重量不再变化(衡重),将烘干后的样品用研磨仪(德国RETSCH,型号MM400)粉碎,粉末过40目筛,存于封口袋中备用。

称取1.0 g的过筛样品压成片状,采用自动热量计对样品进行热值的测定,每个样品均要反复测定5次,最终取其平均值。

称取0.10 g的过筛样品与0.075 g氧化剂(亚硝酸钠)均匀混合,采用全自动燃点检测仪进行燃点的测定,每个样品均要反复测定5次,最终取其平均值。

1.2.4 数据处理 使用Origin 8作图,用SPSS 19.0软件进行统计分析,采用单因素方差分析、双因素方差分析和Duncan检验进行比较参数间的差异。

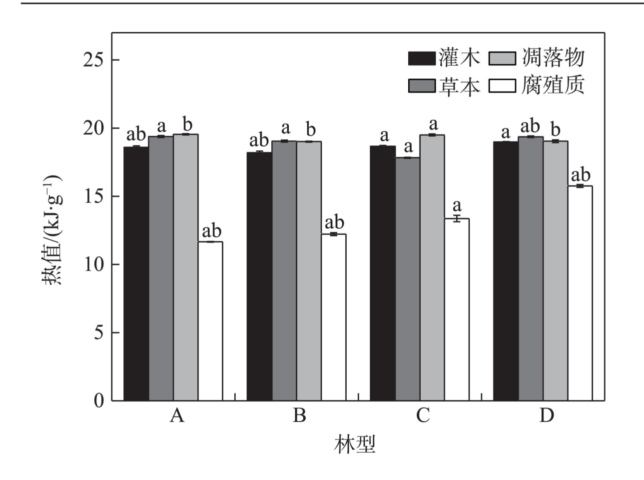
2 结果与分析

2.1 不同组分地表可燃物热值比较

由图3可以看出,各林型中凋落物组分热值一般较高,均值为19.27 kJ·g^{-1};而腐殖质组分热值都较低,均值为13.25 kJ·g^{-1}。同一森林类型下地表可燃物各组分之间多数差异不显著。针叶林和阔叶林中,草本与凋落物组分之间差异显著($P<0.05$),其余组分间差异不显著;灌木林中,灌木与凋落物组分之间差异显著($P<0.05$),其余组分间差异不显著;针阔混交林中,所有组分差异都不显著。

2.2 同一地表可燃物各森林类型间热值比较

由表1可知,不同森林类型同一组分的可燃物



注：A为针叶林；B为阔叶林；C为针阔混交林；D为灌木林。不同小写字母表示同一林型不同组分地表可燃物存在显著性差异（$P<0.05$）。

图3　不同组分地表可燃物热值比较

Fig. 3　Comparison of calorific value of surface combustibles of different components

热值存在差异。灌木可燃物组分中灌木林的热值最高（18.99±0.03 kJ·g^{-1}），针叶林和针阔混交林的差异显著（$P<0.05$），其余林型间差异不显著；草本可燃物组分中针叶林的热值最高（19.38±0.08 kJ·g^{-1}），针叶林和灌木林的差异显著（$P<0.05$），其余林型间差异不显著；凋落物可燃物组分中同样是针叶林的热值最高（19.55±0.05 kJ·g^{-1}），针叶林和针阔混交林的差异显著（$P<0.05$），阔叶林和灌木林的差异显著（$P<0.05$），其余林型间差异不显著；腐殖质可燃物组分中灌木林的热值最高（15.76±0.10 kJ·g^{-1}），所有林型间的差异都不显著。

2.3　不同组分地表可燃物热值与燃点的关系

由图4可知，不同组分地表可燃物热值与燃点间的关系存在差异。灌木可燃物组分燃点与热值存在极显著关系（$R^2=0.81$，$P<0.01$），凋落物可燃物组分燃点与热值存在显著相关性（$R^2=0.38$，$P<0.05$）；然而草本和腐殖质可燃物组分燃点与热值间无显著相关（$P>0.05$）。

2.4　不同组分地表可燃物热值与含水率的关系

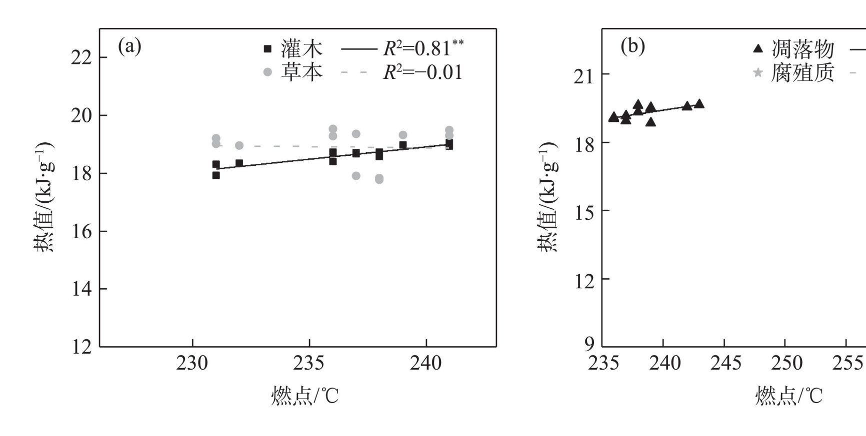
由图5可知，不同组分含水率由高至低分别为：灌木（42.1%）>草本（37.5%）>腐殖质（31.2%）>凋落物（16.3%）。从图5还可以看出，所有地表可燃物热值与绝对含水率之间均无显著相关关系。

表1　同组分地表可燃物不同森林类型间热值比较

Tab. 1　Comparison of calorific value between different forest types of surface fuel with the same component

可燃物组分	林型			
	针叶林	阔叶林	针阔混交林	灌木林
灌木	18.59±0.10a	18.19±0.13ab	18.67±0.05b	18.99±0.03ab
草本	19.38±0.08a	19.05±0.08ab	17.83±0.04ab	19.36±0.06b
凋落物	19.55±0.05ac	19.01±0.04ab	19.50±0.08bd	19.04±0.09cd
腐殖质	11.66±0.02a	12.23±0.11a	13.37±0.23a	15.76±0.10a

注：数据为平均值±标准差。小写字母表示同一组分不同林型地表可燃物存在显著性差异（$P<0.05$）。



注：*表示$P<0.05$；**表示$P<0.01$。

图4　不同组分地表可燃物热值与燃点关系

Fig. 4　Relationship between calorific value and ignition point of surface combustibles of different components

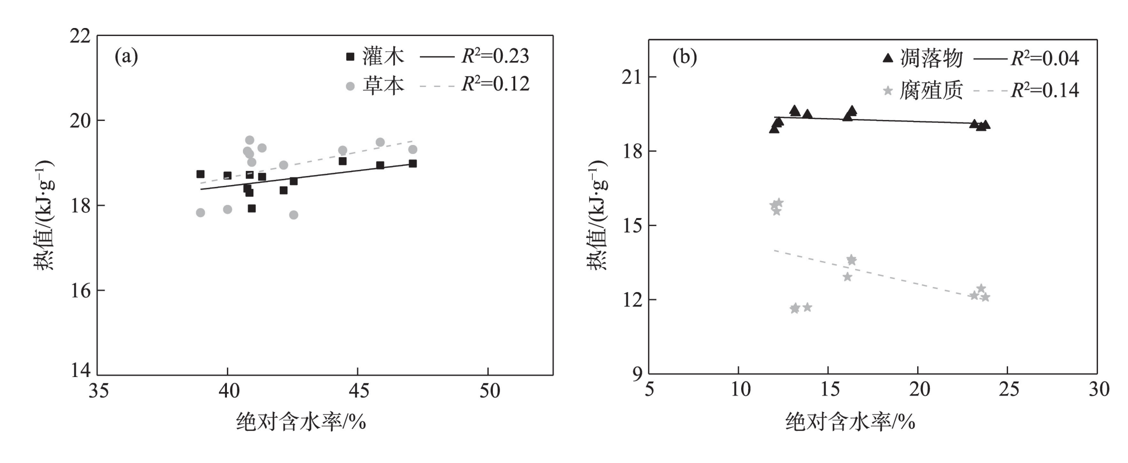


图5 不同组分地表可燃物热值与绝对含水率关系

Fig. 5 Relationship between calorific value and absolute water content of surface combustible of different components

3 讨 论

对森林可燃物的研究可为森林防火灭火和可持续管理提供理论依据,而可燃物的热值是表征可燃物燃烧性的重要指标[22-23]。因此,对天山东部林区各林型下的地表可燃物不同组分(灌木、草本、凋落物以及腐殖质)热值分析是可燃物易燃性研究的基础,也是森林火灾研究的重点。研究结果表明,天山东部林区同一林型不同组分热值大小顺序为:凋落物>草本>灌木>腐殖质,这与武夷山国家公园内4种森林类型地表可燃物热值特征相同[24],但本研究区分析了腐殖质在林区可燃物中的影响,更全面地分析了死亡地表可燃物的热值特征,通过结果可知,腐殖质作为热值最小的组分,其占比多少有可能是森林火险发生的关键因子。另外,同一森林类型下地表可燃物各组分之间多数差异不显著,这也与武夷山国家公园的研究结果一致,同时也说明凋落物是研究区防火灭火应关注的重点对象。针叶林和阔叶林中,草本与凋落物组分之间差异显著,其余组分间差异不显著;灌木林中,灌木与凋落物组分之间差异显著,其余组分间差异不显著;针阔混交林中,所有组分差异都不显著。各林型不同组分间的差异可能与组分的植被类型相关,也可能与植被光合作用强度有关。

森林火灾的发生与森林地表可燃物的热值高低有密切的关系,而地表可燃物热值对于林火燃烧速度和火线强度有较大的影响,热值的高低可以反映森林林火的强度,因此,对不同林型地表可燃物的热值研究非常必要[25-26]。天山东部林区不同森林类型同一组分的可燃物热值存在差异。灌木可燃物组分中灌木林的热值最高(18.99±0.03 kJ·g^{-1}),针叶林和针阔混交林的差异显著,其余林型间差异不显著。这可能是因为灌木林型下光照好,有利于灌木生长,可充分进行光合作用,固定太阳能较多[25]。草本可燃物组分中针叶林的热值最高(19.38±0.08 kJ·g^{-1}),针叶林和灌木林的差异显著,其余林型间差异不显著;凋落物可燃物组分中同样是针叶林的热值最高(19.55±0.05 kJ·g^{-1}),针叶林和针阔混交林的差异显著,阔叶林和灌木林的差异显著,其余林型间差异不显著。由于针叶林叶面积对光照影响较小,导致地面草本与凋落物可接收阳光辐射高,因此热值也较高。腐殖质可燃物组分中灌木林的热值最高(15.76±0.10 kJ·g^{-1}),所有林型间的差异都不显著。这也说明腐殖质的热值不受林型的影响。通过与阿尔泰山主要林型燃烧性[15]综合比较发现,天山东部主要林型的燃烧性从易到难的顺序为:针叶林>灌木林>针阔混交林>阔叶林。因此,在天山东部林区针叶林和灌木林是森林火灾发生和蔓延的重点区域,应作为重点的森林防火保护区域。

天山东部林区不同组分地表可燃物热值与燃点间的关系存在差异。灌木可燃物组分燃点与热值存在极显著关系($R^2=0.81$, $P<0.01$),凋落物可燃物组分燃点与热值存在显著相关性($R^2=0.38$, $P<0.05$);然而草本和腐殖质可燃物组分燃点与热值间无显著相关。但是通过与我国东北辽宁阜新地区4种油松林热值燃点[27]综合对比发现,研究区凋落物和腐殖质组分相比于草本和灌木组分属于不易燃物质。然而也有研究表明,挥发性油和脂肪

类物质与可燃物的热值与燃点密切相关[17],未来的研究可以针对不同组分油性或脂肪类物质的含量进行比较,进一步阐明同组分地表可燃物热值与燃点间的关系。

天山东部林区所有类型的地表可燃物热值与绝对含水率之间均无显著相关关系。天山中部典型林区内的研究表明,可燃物含水率越低,其易燃性就越强,引起森林火灾的可能性较大;反之亦然[28]。说明研究区地表可燃物的热值高低与易燃性无关。也有研究表明,森林可燃物的含水率变化受多个因素(如树种、地形、气温、相对湿度、降水、风速以及太阳辐射等)综合影响,不能仅考虑单个因子的影响[21]。针对不同地区条件,筛选显著的预报因子,建立准确性较高的预测模型,可为未来我国森林防火预报研究工作提供有力的数据支撑。

4 结 论

以新疆天山东部4种典型植被类型下地表可燃物为研究对象,分析地表可燃物热值特征及其与燃点、绝对含水率之间的关系。研究结果显示,天山东部林区同一林型不同组分热值大小顺序为:凋落物>草本>灌木>腐殖质。草本可燃物组分中针叶林的热值最高(19.38±0.08 kJ·g^{-1}),凋落物可燃物组分中同样是针叶林的热值最高(19.55±0.05 kJ·g^{-1})。研究区草本(在阔叶林和灌木林中)和凋落物(在针叶林和混交林中)的热值较高,是森林防火需要重点关注的对象,而腐殖质在各林型中的热值都较低,可以起到一定的抗火作用。不同组分地表可燃物热值与燃点间的关系存在差异:灌木可燃物组分燃点与热值存在极显著关系($R^2=0.81$,$P<0.01$),凋落物可燃物组分燃点与热值存在显著相关性($R^2=0.38$,$P<0.05$),然而草本和腐殖质可燃物组分燃点与热值间无显著相关($P>0.05$)。研究结果旨在为天山东部可燃物能量释放、林火强度的参数确定提供理论依据,为研究区森林地表可燃物精准管理提供数据支撑。

参考文献(References):

[1] Neumann M, Vila-Vilarde L, Muller M, et al. Fuel loads and fuel structure in Austrian coniferous forests[J]. International Journal of Wildland Fire, 2022, 31(7): 693-707.

[2] 孙龙, 鲁佳宇, 魏书精, 等. 森林可燃物载量估算方法研究进展[J]. 森林工程, 2013, 29(2): 26-31. [Sun Long, Lu Jiayu, Wei Shujing, et al. Research progress of forest fuel load estimation methods[J]. Forest Engineering, 2013, 29(2): 26-31.]

[3] 高国平, 周志权, 王忠友. 森林可燃物研究综述[J]. 辽宁林业科技, 1998(4): 34-37. [Gao Guoping, Zhou Zhiquan, Wang Zhongyou. A review of forest fuel research[J]. Journal of Liaoning Forestry Science & Technology, 1998(4): 34-37.]

[4] Jones M W, Abatzoglou J T, Veraverbeke S, et al. Global and regional trends and drivers of fire under climate change[J]. Reviews of Geophysics, 2022, 60: e2020RG000726.

[5] 梁瀛, 张思玉, 努尔古丽, 等. 天山中部林区主要树种理化性质及燃烧性分析[J]. 林业科学, 2011, 47(12): 101-105. [Liang Ying, Zhang Siyu, Nu Erguli, et al. Physical and chemical properties and combustibility of main wood species in the central part of Tianshan Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(12): 101-105.]

[6] 满子源, 孙龙, 胡海清, 等. 南方8种森林地表死可燃物在平地无风时的燃烧蔓延速率与预测模型[J]. 林业科学, 2019, 55(7): 197-204. [Man Ziyuan, Sun Long, Hu Haiqing, et al. Prediction model of the spread rate of eight typical surface dead fuel in southern China under windless and flat land[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(7): 197-204.]

[7] Arroyo L A, Pascual C, Manzanera J A. Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 256(6): 1240-1247.

[8] 周涧青, 刘晓东, 张思玉. 兴安落叶松人工林地表可燃物分布研究[J]. 森林防火, 2019, 37(1): 19-23. [Zhou Jianqing, Liu Xiaodong, Zhang Siyu. Study on the distribution of surface combustibles in *Larix gmelinii* plantation[J]. Journal of Wildland Fire Science, 2019, 37(1): 19-23.]

[9] Gautam S, Pulkki R, Shahi C, et al. Fuel quality changes in full tree logging residue during storage in roadside slash piles in Northwestern Ontario[J]. Biomass Bioenergy, 2012, 42: 43-50.

[10] 潘登. 南亚热带典型人工林可燃物空间分布及潜在火行为研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017. [Pan Deng. Distribution of Fuel and Potential Fire Behavior of Typical Plantations in Southern China[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2017.]

[11] Ovington J D, Heitkamp D. The accumulation of energy in forest plantations in Britain[J]. Ecology, 1960, 48(3): 639-646.

[12] Bliss L C. Caloric and lipid content in alpine tundra plants[J]. Ecology, 1962, 43(4): 753-757.

[13] Golley F B. Caloric value of wet tropical forest vegetation[J]. Ecology, 1969, 50(3): 517-519.

[14] Lunguleasa A, Spirchez C, Zeleniuc O. Evaluation of the calorific values of wastes from some tropical wood species[J]. Maderas: Cienciay Tecnologia, 2020, 22(3): 269-280.

[15] 包艳丽, 牛树奎, 孙国庆, 等. 阿尔泰山主要林型燃烧性研究[J].

干旱区资源与环境, 2010, 24(4): 134-137. [Bao Yanli, Niu Shukui, Sun Guoqing, et al. The combustibility about major forest types in Altay mountains[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(4): 134-137.]

[16] 何诚, 舒立福, 张思玉, 等. 大兴安岭森林草原地下火阴燃特征研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(2): 103-110. [He Cheng, Shu Lifu, Zhang Siyu, et al. Research on underground fire smouldering characteristics of forest steppe in Great Xing'an Mountains in Heilongjiang Province[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2020, 40(2): 103-110.]

[17] 赵凤君, 王秋华, 舒立福, 等. 大兴安岭针叶可燃物的热值和燃点与其超临界萃取物含量的相关性[J]. 林业科学, 2016, 52(4): 68-74. [Zhao Fengjun, Wang Qiuhua, Shu Lifu, et al. Correlations between supercritical extracts of coniferous fuel and the heat yield value and ignition point[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(4): 68-74.]

[18] 王秋华, 肖慧娟, 刘文国, 等. 昆明西山森林公园主要林型地表可燃物的潜在燃烧性[J]. 福建林业科技, 2014, 41(1): 40-44. [Wang Qiuhua, Xiao Huijuan, Liu Wenguo, et al. Study on potential combustibility of ground fuels in Kunming Xishan National Forest Park[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2014, 41(1): 40-44.]

[19] 闫想想, 王秋华, 李彩松, 等. 昆明重大森林火灾火烧迹地可燃物研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2019, 39(5): 157-164. [Yan Xiangxiang, Wang Qiuhua, Li Caisong, et al. Combustibles in fires of major forest fires in Kunming[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2019, 39(5): 157-164.]

[20] 王秋华, 肖慧娟, 徐盛基, 等. 滇中安宁"3·29"重大森林火灾火烧迹地灌木林的燃烧性研究[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(1): 138-141. [Wang Qiuhua, Xiao Huijuan, Xu Shengji, et al. Retrogressive study and analysis of the burning features of the shrubs in the fire taking place on 29 March 2006 in Anning, Yunnan[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(1): 138-141.]

[21] 田甜, 邸雪颖. 森林地表可燃物含水率变化机理及影响因子研究概述[J]. 森林工程, 2013, 29(2): 21-25. [Tian Tian, Di Xueying. Research review on change mechanism and impact factors of forest surface fuel moisture[J]. Forest Engineering, 2013, 29(2): 21-25.]

[22] 黄钰辉, 官丽莉, 周国逸, 等. 西双版纳热带季节雨林和哀牢山中山湿性常绿阔叶林优势植物及地表凋落物层的热值[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 457-463. [Huang Yuhui, Guan Lili, Zhuo Guoyi, et al. Gross caloric values of dominant species and litter layer in mid-montane moist evergreen broad-leaved forest in Ailao mountain and in tropical season rain forest in Xishu-angbanna, Yunnan, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 457-463.]

[23] 朱美琴, 叶功富, 游水生, 等. 东山岛海岸带季风常绿阔叶林各层次优势种的热值[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2012, 41(3): 248-252. [Zhu Meiqin, Ye Gongfu, You Shuisheng, et al. Caloric values of the dominant species from different layers of monsoon evergreen broad-leaved forest at Dongshan Island[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University, 2012, 41(3): 248-252.]

[24] 李颖, 严思晓, 张秀芳, 等. 武夷山国家公园内4种森林类型地表可燃物热值特征比较[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(6): 1385-1391. [Li Ying, Yan Sixiao, Zhang Xiufang, et al. Comparison of surface fuel calorific value characteristics of four forest types in Wuyishan National Park[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, 26(6): 1385-1391.]

[25] 杨春勐, 张树斌, 陈爱国, 等. 干热河谷稀树灌丛优势植物叶片热值及养分特征[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(1): 54-60. [Yang Chunmeng, Zhang Shubing, Chen Aiguo, et al. Caloric value and nutrients in the leaves of dominant savanna plant species in Yuanjiang dry-hot valley[J]. Journal of Forest and Environment, 2019, 39(1): 54-60.]

[26] 林益明, 林鹏, 王通. 几种红树植物木材热值和灰分含量的研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 181-184. [Lin Yiming, Lin Peng, Wang Tong. Caloric values and ash contents of some mangrove woods[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(2): 181-184.]

[27] 云丽丽, 王睿照, 刘晗琪, 等. 4种主要林型可燃物载量及其燃烧性研究[J]. 辽宁林业科技, 2021(5): 26-30. [Yun Lili, Wang Ruizhao, Liu Hanqi, et al. Fuel loads and its combustibility of four main forest types[J]. Liaoning Forestry Science & Technology, 2021(5): 26-30.]

[28] 努尔古丽·马坎, 张毓涛, 岳朝阳, 等. 天山中部9种乔灌木可燃物含水率及脂肪含量分析[J]. 安徽农业大学学报, 2012, 39(6): 925-929. [Nuerguli Makan, Zhang Yutao, Yue Zhaoyang, et al. Analysis of the water content and fuel moisture content of forest combustible in the center of Tianshan Mountains[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2012, 39(6): 925-929.]

Calorific values of forest surface fuels in the eastern Tianshan Mountains of Xinjiang, China

ZHOU Xiang[1], WANG Peng[2,3], Bumaliyamu MAIMAITI[2,3], WANG Qiuyan[2,3], YUE Jian[2]
(1. Xinjiang Uygur Autonomous Region Forestry Planning Institute, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. Cele National Field Science Observation and Research Station of Desert Grassland Ecosystem, Cele 848300, Xinjiang, China)

Abstract: Forest surface combustibles are one of the important factors in forest fire propagation, and their calorific values are an important index by which to assess combustibility. This study has aimed to assess the surface fuels available in four typical vegetation types in the eastern Tianshan Mountains of Xinjiang, China. The characteristics of the surface fuel calorific values and relationship with ignition point and absolute moisture content were analyzed. The results show that in coniferous and broad-leaved forests, there were significant differences between herb and litter components, while in shrub forest, there were significant differences between shrub and litter components. Within the same forest the calorific values were litter > herb > shrub > humus. The calorific values in the coniferous forests were the highest among the herbaceous fuel components (19.38 ± 0.08 kJ·g^{-1}), while those in the coniferous forests were highest among the litter fuel components (19.55 ± 0.05 kJ·g^{-1}). Differences were identified in the relationship between the calorific value and the ignition point of the surface combustibles for the different components. There was a significant correlation between the burning point of the shrub fuel components and the calorific value (R^2 = 0.81, P < 0.01), and between the burning point of litter fuel components and the calorific value (R^2 = 0.38, P < 0.05). However, there was no significant correlation between the burning point and calorific value of the herbs and humus (P > 0.05). In addition, there was no significant correlation between the calorific values of the surface fuel and the absolute moisture content of all forest types. Forest type, tree species, physical and chemical properties, and other conditions were thus found to have a comprehensive effect on the calorific values of the different fuels. The results of this study provide a theoretical basis for forest fire management in the eastern Tianshan Mountains as they will help to accurately predict the calorific energy and potential forest fire risks and provide data support for in-depth research on regional surface fuels.

Keywords: forest; calorific value; surface combustibles; ignition point; absolute water content; eastern Tianshan Mountains